

УДК 621.64:621.3:537

### ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ТЕМПЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

**В. Г. Ковальчук, Т. В. Коренькова**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: viktorija\_kovalc@mail.ru

Показано, что прямой пуск насосных агрегатов электрогидравлических комплексов характеризуется существенными бросками тока, динамического момента и напора, что приводит к снижению ресурса работы электромеханического оборудования, развитию гидравлических ударов, авариям в трубопроводной сети. Предложена математическая модель электрогидравлического комплекса для исследования влияния темпа изменения входного напряжения на протекание переходных процессов в системе. Доказано, что использование плавного запуска/останова насосного агрегата позволяет снизить динамические нагрузки на двигатель, исключить появление колебаний в напоре и производительности, снизить потери энергии при пуске. Показано, что на протекание переходных процессов в электрогидравлическом комплексе оказывают влияние время разгона/торможения, геометрия трубопровода, наличие статического напора на отдельных участках гидросети, способ запуска технологического механизма. Сформулированы основные рекомендации к выбору закона формирования входного воздействия.

**Ключевые слова:** электрогидравлический комплекс, переходные процессы, плавный запуск/останов, динамические нагрузки.

### ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ В ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ ПРИ РІЗНОМУ ТЕМПІ ЗМІНИ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ

**В. Г. Ковальчук, Т. В. Коренькова**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: viktorija\_kovalc@mail.ru

Показано, що прямий запуск насосних агрегатів електрогидравлічних комплексів характеризується суттєвими стрибками струму, динамічного моменту й напору, що призводить до зниження ресурса роботи електро-механічного обладнання, розвитку гідравлічних ударів, аваріям у трубопровідній мережі. Запропоновано математичну модель електрогидравлічного комплексу для дослідження впливу темпу зміни вхідної напруги на протікання перехідних процесів у системі. Доведено, що використання плавного пуску/зупинки насосного агрегату дозволяє знизити динамічні навантаження на двигун, уникнути появи коливань у напорі й продуктивності, зменшити втрати енергії при запуску. Показано, що на протікання перехідних процесів у електрогидравлічному комплексі впливають час розгону/гальмування, геометрія трубопроводу, наявність статичного напору на окремих ділянках гідромережі, спосіб запуску технологічного механізму. Сформульовано основні рекомендації до вибору закону формування вхідного впливу.

**Ключові слова:** електрогидравлічний комплекс, перехідні процеси, плавний запуск, динамічні навантаження.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Частые прямые пуски насосных агрегатов (НА) в составе электрогидравлических комплексов (ЭГК) промышленного и коммунального водоснабжения и водоотведения характеризуются рядом существенных недостатков, связанных с нежелательным воздействием на электрический двигатель, исполнительный механизм (насос), трубопроводную сеть [1, 2].

Так, в переходных процессах при прямом пуске асинхронного двигателя (АД) пиковые броски тока в 5–6 раз больше номинальных, что приводит к преждевременному износу изоляции и снижению ресурса работы электродвигателя [3]. Наличие знакопеременных динамических моментов в 4–5 раз выше номинального приводят к повышенным вибрациям электро-механического оборудования. Вследствие формирования значительных волн давления при пуске в трубопроводной сети возникают гидравлические удары, приводящие к дополнительным нагрузкам на трубы, соединения и возможным порывам трубопроводной магистрали [1–3].

При остановке НА прямым отключением электро-

привода (ЭП) от энергосети также возникают существенные проблемы ввиду слишком быстрой остановки электрической машины. Из-за большого потока массы жидкости в трубопроводе перекачиваемая среда еще некоторое время продолжает двигаться с той же скоростью, а затем меняет направление. Это вызывает существенные броски давления, оказывает большие механические перегрузки в трубопроводе и негативно влияет на работу насосного оборудования [1, 3, 4].

Для предотвращения указанных недостатков прямого пуска/остановки НА необходимо осуществлять плавный разгон/торможение электродвигателя с заданным темпом нарастания/снижения входного напряжения [5]. Это позволит снизить динамические нагрузки в гидросистеме, продлить ресурс работы электрогидравлического оборудования.

Возникновение различного рода динамических нагрузок в гидросистеме в переходных режимах приводит также к изменению энергетических параметров работы электрогидравлического оборудования: электрической мощности, подводимой к стартовым обмоткам двигателя, механической мощно-

сти на валу насосного агрегата, гидравлических мощностей на выходе насоса, на участках трубопровода и у потребителя, росту потерь мощности на элементах силового канала электрогидравлического комплекса [6, 7].

С учетом сказанного, целью работы является обоснование выбора закона формирования входного воздействия на электропривод насосного агрегата, позволяющего ограничить динамические нагрузки и потери энергии в переходных режимах электрогидравлического комплекса.

#### МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

##### А. Разработка математической модели ЭГК

Для исследования переходных процессов в ЭГК предложена математическая модель, включающая: блок формирования входного воздействия, блок формирования закона управления преобразователем частоты, насосный агрегат, трубопроводную сеть с потребителем в конце (рис. 1).

Преобразователь частоты, формирующий квадратичный закон изменения напряжения и частоты, описан аperiodическим звеном I-го порядка:

$$W_{fc}(p) = \frac{U_m(p)}{f(p)} = \frac{k_{fc}}{T_{fc}p + 1}, \quad (1)$$

где  $U_m(p)$  – напряжение на выходе ПЧ, В;  $f(p)$  – частота питающего напряжения, Гц;  $k_{fc}$ ,  $T_{fc}$  – коэффициент пропорциональности и постоянная времени ПЧ соответственно, с.

Дифференциальные уравнения асинхронного ЭП насоса при частотном управлении, представленные в форме потокосцеплений для синхронной системы координат, вращающейся со скоростью поля статора и условиях  $\omega_k = \omega_{0e}$ ,  $u_2 = 0$ , имеют вид [8]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\psi_{1u}}{dt} &= -\frac{R_s\psi_{1u}}{L_r\sigma} + \frac{R_sL_\mu\psi_{2u}}{L_rL_s\sigma} + \omega_0\psi_{1v} + U_{1m}; \\ \frac{d\psi_{1v}}{dt} &= -\frac{R_s\psi_{1v}}{L_r\sigma} + \frac{R_sL_\mu\psi_{2v}}{L_rL_s\sigma} - \omega_0\psi_{1u}; \\ \frac{d\psi_{2u}}{dt} &= -\frac{R'_r\psi_{2u}}{L_s\sigma} + \frac{R'_rL_\mu\psi_{1u}}{L_rL_s\sigma} + \omega_{2e}\psi_{2v}; \\ \frac{d\psi_{2v}}{dt} &= -\frac{R'_r\psi_{2v}}{L_s\sigma} + \frac{R'_rL_\mu\psi_{1v}}{L_rL_s\sigma} - \omega_{2e}\psi_{2u}; \\ i_{1v} &= (\psi_{1v}L_s - \psi_{2v}L_\mu) / (L_rL_s - L_\mu^2); \\ i_{1u} &= (\psi_{1u}L_s - \psi_{2u}L_\mu) / (L_rL_s - L_rL_\mu); \\ u_{1v} &= R_s i_{1v} + d\psi_{1v}/dt + \omega_0\psi_{1u}; \\ u_{1u} &= R_s i_{1u} + d\psi_{1u}/dt + \omega_0\psi_{1v}; \\ M &= (3/2)p_p L_\mu / (L_rL_s\sigma) (\psi_{1v}\psi_{2u} - \psi_{1u}\psi_{2v}); \\ \omega_{2e} &= \omega_0 - p_p\omega, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где  $\psi_{1u}$ ,  $\psi_{1v}$ ,  $\psi_{2u}$ ,  $\psi_{2v}$  – потокосцепления статора и ротора электрической машины по координатам  $u$  и  $v$  соответственно, Вб;  $U_{1m}$  – амплитудное значение напряжения питания статорной обмотки, В;  $R_s$ ,  $R_r$  –

активные сопротивления обмоток статора и ротора соответственно, Ом;  $L_s$ ,  $L_r$  – индуктивности фаз статора и ротора соответственно, Гн;  $L_\mu$  – взаимоиндуктивность обмоток статора и ротора, Гн;  $\sigma$  – коэффициент рассеяния;  $\omega_0$ ,  $\omega_{2e}$ ,  $\omega$  – синхронная угловая скорость магнитного поля, частота скольжения и текущая частота вращения ротора АД соответственно, с<sup>-1</sup>;  $M$ ,  $M_s$  – вращающий электромагнитный и статический моменты на валу электрической машины, Нм;  $p_p$  – число пар полюсов;  $J_\Sigma$  – суммарный приведенный момент инерции АД и насоса, кг·м<sup>2</sup>.

Переменные параметры машины, изменяющиеся синусоидально, преобразуются в величины постоянного тока  $i_1$ ,  $i_2$ , которые характеризуют проекции векторов на оси синхронной системы координат ( $u-v$ ).

Момент сопротивления, создаваемый насосом, Нм [9]:

$$M_s = \frac{P_b}{\omega} = \frac{\rho g H_p Q_p}{\eta_p \omega}, \quad (3)$$

где  $P_b = A_3 v^2 Q + B_3 v Q^2 + D_3 v^3$  – мощность, подводимая к валу насоса, Вт;  $v = \omega/\omega_n$  – относительная частота вращения рабочего колеса насоса;  $\omega_n$  – номинальная угловая частота вращения ЭП насоса, с<sup>-1</sup>;  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $H_p$  – напор насоса, м;  $Q_p$  – производительность насоса, м<sup>3</sup>/с;  $\eta_p$  – КПД насоса;  $A_3, B_3, D_3$  – коэффициенты аппроксимации, определяемые по паспортным характеристикам насосов.

Напорно-расходная характеристика НА описана выражением вида, м [9]:

$$H_p = H_0 v^2 - R_p Q_p^2, \quad (4)$$

где  $H_0$  – напор, развиваемый насосом при нулевой подаче и зависящий от частоты вращения рабочего колеса, м;  $R_p$  – внутреннее сопротивление насоса, с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>.

Для описания волновых процессов в трубопроводной сети используются телеграфные уравнения, решение которых находится методом конечных элементов [9]. При этом трубопроводная сеть представляется неразветвленной системой из последовательно соединенных взаимосвязанных участков трубопровода, где выходные параметры (напор, расход) предыдущего участка являются входными для последующего. Система дифференциальных уравнений трубопроводной сети имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} H_i - H_{i-1} + l_0 l_{sect} \frac{dQ_{i-1}}{dt} + r_0 l_{sect} Q_{i-1} |Q_{i-1}| &= 0; \\ \frac{dH_i}{dt} + c_0 \frac{1}{l_{sect}} (Q_i - Q_{i-1}) &= 0, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

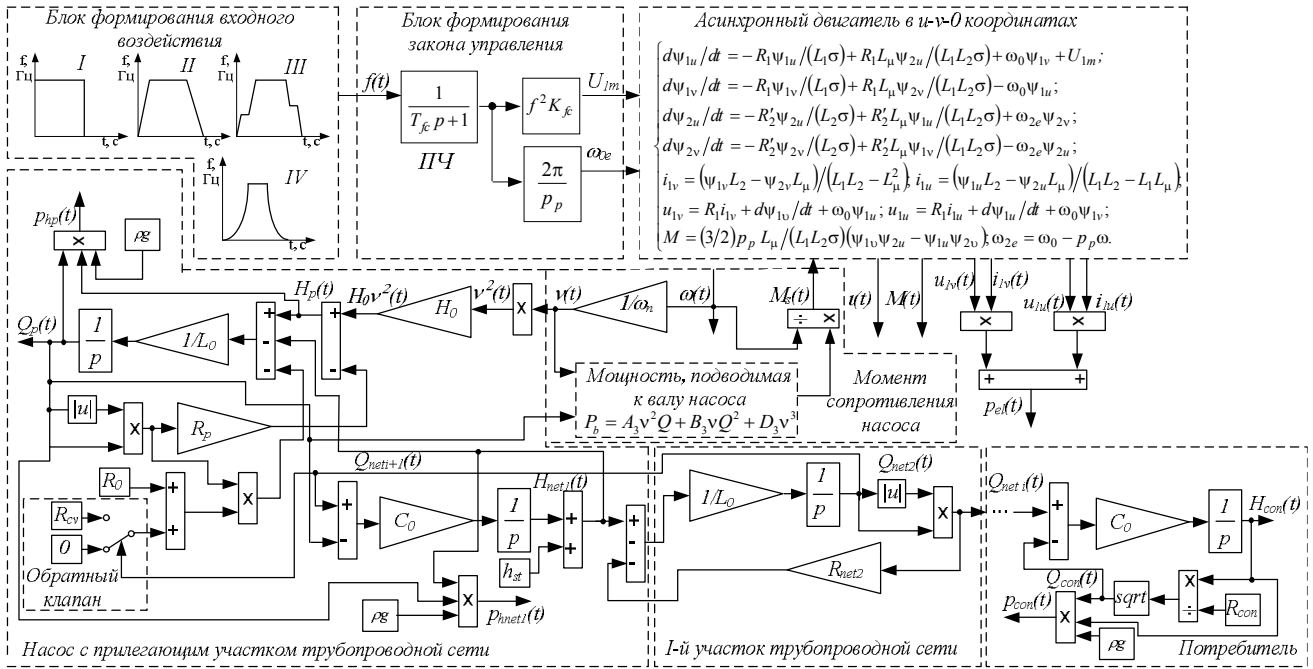


Рисунок 1 – Математическая модель электрогидравлического комплекса

где  $r_0 = \frac{\lambda}{S^2 d} \frac{1}{2g}$  – удельное гидравлическое сопротивление участка трубопроводной сети,  $c^2/m^5$ ;  $c_0 = \frac{c^2}{Sg}$ ;  $l_0 = \frac{1}{Sg}$  – гидравлические емкостное и индуктивное сопротивления участка трубопроводной сети соответственно,  $c^2/m^5$ ,  $m^{-1}$ ;  $H_i, Q_i, H_{i-1}, Q_{i-1}$  – напор и производительность на выходе и входе  $i$ -го участка сети соответственно,  $m$ ,  $m^3/c$ ;  $c$  – скорость распространения звука в среде,  $m/c$ ;  $d$  – диаметр трубопровода,  $m$ ;  $\lambda$  – безразмерный коэффициент, учитывающий потери на трение на участке трубопровода. Гидравлическая характеристика потребителя имеет вид:

$$H_{con} - h_{st} = R_{con} Q_{con}^2, \quad (6)$$

где  $H_{con}$ ,  $Q_{con}$  – напор и расход в сети потребителя соответственно,  $m$ ,  $m^3/c$ ;  $h_{st}$  – статический напор в трубопроводе,  $m$ ;  $R_{con}$  – гидравлическое сопротивление потребителя,  $c^2/m^5$ .

Блоком формирования входного воздействия (рис. 1) на вход преобразователя частоты задается входное воздействие, позволяющее осуществить ступенчатый (кривая I), линейный (кривая II), плавный с ограничением пускового тока (кривая III) и изменяющийся по параболическому закону (кривая IV) запуск/останов электродвигателя насоса. При этом особенностью кривой III является возможность ограничения пускового тока: при достижении порогового значения тока увеличение напряжения временно прекращается, после чего процесс нарастания напряжения возобновляет-

ся до его номинального значения. Такой закон формирования входного воздействия используется в ЭП насосов, вентиляторов, компрессоров, центрифуг, конвейеров, где имеют место повышенные пусковые токовые и динамические нагрузки с появлением пиковых выбросов в крутящем моменте или токе [4, 5].

#### В. Исследование переходных процессов в ЭГК

В качестве объекта моделирования выбрана насосная станция II-го подъема системы водоснабжения г. Кременчуга с параметрами: двигателя  $P_n = 800$  кВт,  $U_n = 6000$  В,  $\omega_n = 157$   $c^{-1}$ ,  $I_n = 94,5$  А,  $M_n = 2547,8$  Нм; насоса  $Q_p = 0,75$   $m^3/c$ ,  $H_p = 80$  м,  $A_3 = 1181,818$ ,  $B_3 = -619,835$ ,  $D_3 = 150$  и трубопроводной сети  $d = 1,2$  м,  $l = 5000$  м,  $h_{st} = 20$  м,  $n = 20$ ,  $r_0 = 0,4566$ ,  $c_0 = 407,7472$ ,  $l_0 = 0,0392$ ,  $R_{con} = 291,6$   $c^2/m^5$ .

При анализе переходных процессов выбор времени пуска  $t_s$  ЭП промышленных механизмов осуществляется в соответствии с условием  $I \leq 1,5 I_n$ , где  $I$ ,  $I_n$  – пусковой и номинальный ток электродвигателя соответственно, А [3]. При этом время пуска  $t_s$  зависит от механической постоянной  $T_m$  времени двигателя. В рассматриваемой модели пуск НА осуществляется в течение 5 с, а останов – 7 с (время останова  $t_f = (1,4 - 2)t_s$ , что позволит плавно снижать напряжение на ЭП без образования повышенных волн давления в трубопроводе).

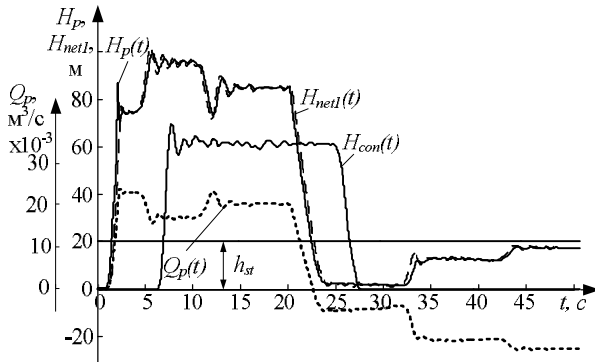
Особенностью запуска НА является увеличение гидродинамического момента на валу одновременно с ростом производительности. Сказанное обуславливает необходимость облегчения условий работы двигателя за счет пуска в режиме нулевой производительности – на закрытую задвижку или дисковый затвор [6, 7].

Пуск турбомеханизма на открытую задвижку характеризуется повышенным гидродинамическим моментом сопротивления и возможен на насосных станциях, оборудованных обратными клапанами, при достаточно большом давлении за обратным клапаном и требуют специальных расчетов на гидравлический удар.

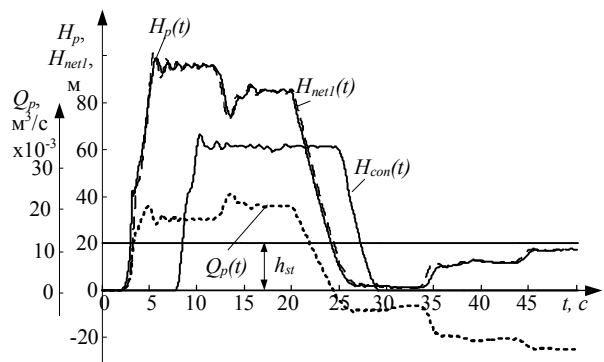
Кривые изменения электромеханических и технологических параметров ЭГК при формировании входного воздействия различной формы

приведены на рис. 2–4, где  $M(t), I(t)$  – кривые изменения электромагнитного момента и тока электрического двигателя соответственно;  $H_p(t), H_1(t), H_{con}(t)$  – кривые изменения напора на выходе насоса, первого участка гидросети и у потребителя соответственно;  $Q_p(t)$  – кривая изменения производительности на выходе насоса.

Анализ полученных кривых показал (рис. 2,а), что прямой пуск насоса на открытую задвижку сопровождается скачком напора порядка 10 % от рабочего значения. Напор у потребителя начинает формироваться на 5 с, что обусловлено инерционностью потока и большой протяженностью трубопровода.

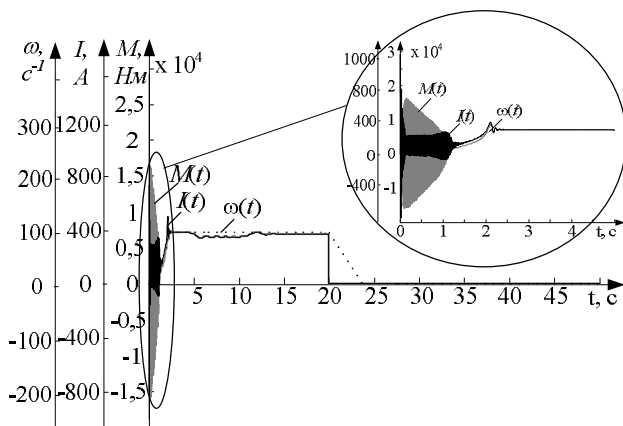


а)

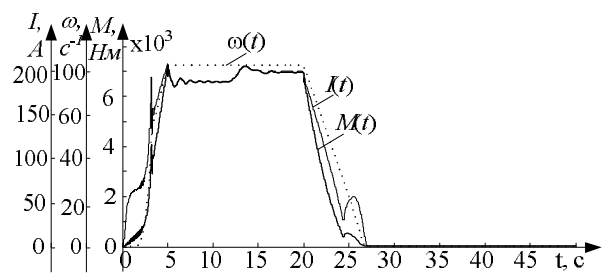


б)

Рисунок 2 – Кривые изменения напора на выходе насоса  $H_p(t)$ , на выходе первого участка трубопроводной сети  $H_{net1}(t)$ , у потребителя  $H_{con}(t)$  и производительности  $Q_p(t)$  на выходе насоса при ступенчатом а) и линейном б) темпах изменения входного воздействия



а)



б)

Рисунок 3 – Кривые изменения частоты вращения  $\omega(t)$ , тока  $I(t)$  и электромагнитного момента  $M(t)$  электродвигателя при ступенчатом а) и линейном б) темпах изменения входного воздействия

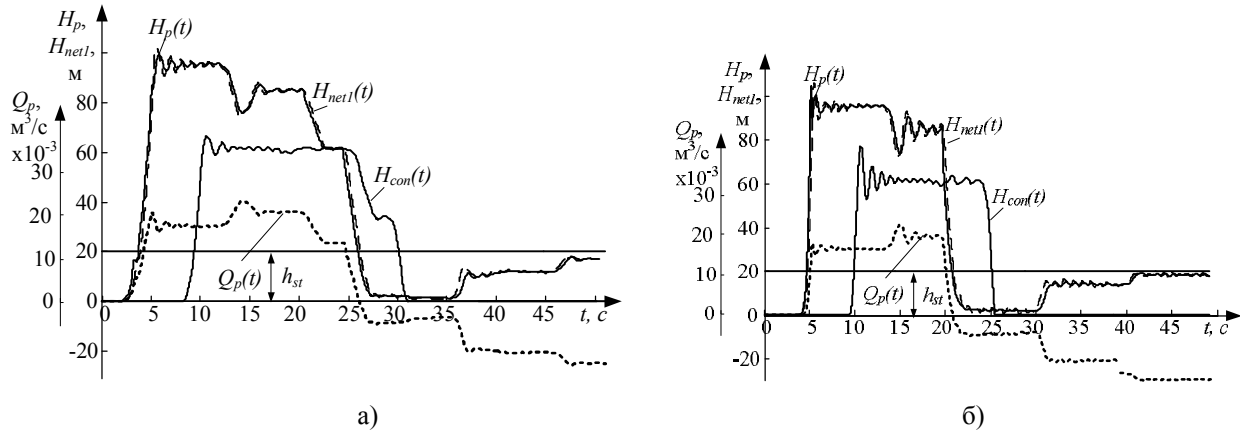


Рисунок 4 – Кривые изменения напора на выходе насоса  $H_p(t)$ , на выходе первого участка трубопроводной сети  $H_{net1}(t)$ , у потребителя  $H_{con}(t)$  и производительности  $Q_p(t)$  на выходе насоса при плавном запуске а) с функцией ограничения тока и параболическом б) законах изменения входного воздействия

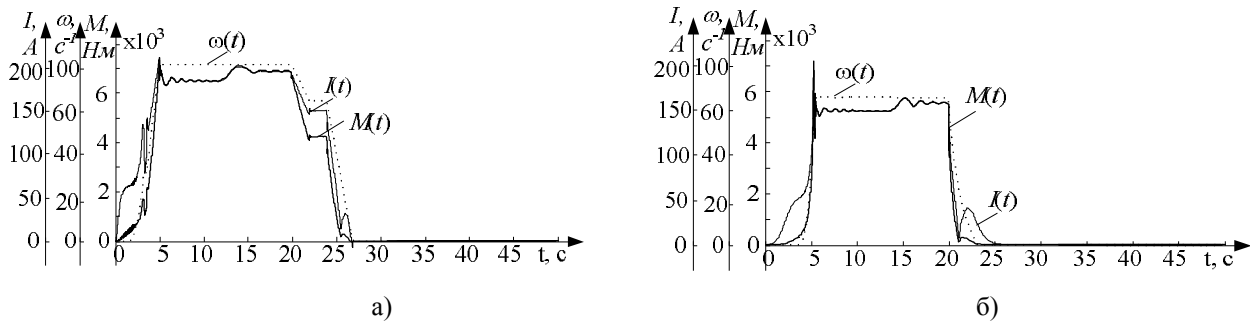


Рисунок 5 – Кривые изменения частоты вращения  $\omega(t)$ , тока  $I(t)$  и электромагнитного момента  $M(t)$  электродвигателя при плавном запуске а) с функцией ограничения тока и параболическом б) законах изменения входного воздействия

В момент времени  $t = 20$  с происходит резкий останов насоса (например, по причине аварийного отключения электроэнергии), который приводит к появлению противотока жидкости, падению напора как на выходе НА, так и на участках трубопровода с их последующим ростом до значения противодавления  $h_{st} = 20$  м. В режиме противотока рабочее колесо тормозится потоком обратного движения жидкости, что приводит к снижению частоты вращения ротора до нуля и последующему разгону асинхронного двигателя в обратном направлении. В данном случае гидравлический момент становится максимальным. Такой режим работы снижает надежность и долговечность работы оборудования.

В кривой угловой частоты вращения (рис. 3,а) присутствуют незначительные колебания при пуске, двигатель выходит на номинальную частоту вращения с первой секунды, при этом превышение составляет 10 % от номинального значения. Прямой останов насоса сопровождается снижением частоты за четыре секунды, что обусловлено особенностью выбега высокоинерционного двигателя.

Прямой пуск НА приводит также к появлению повышенных пусковых токов (порядка  $0,75 I_n$ ) и моментов ( $0,60 M_n$ ), выход на номинальное значение производится со второй секунды, т.к. в данный момент времени происходит наброс нагрузки (рис. 3,а).

Переходные процессы в ЭГК при линейном нарастании напряжения приведены на рис. 2,б, 3,б.

Анализ полученных кривых показал эффективность применения линейного закона изменения напряжения по сравнению со ступенчатым (прямым) пуском, т.к. практически отсутствуют превышения напора и производительности (порядка 5 %), тока (10 %) и момента (15 %). Форма полученных кривых отображает вид формируемого напряжения, при этом наброс нагрузки на второй секунде приводит к прогибу в сигналах тока и электромагнитического момента. Останов НА при линейном законе формирования напряжения сопровождается плавным убыванием всех параметров на протяжении 5 с.

Плавный запуск НА с функцией ограничения пускового тока на 2 с является более эффективным способом по сравнению с предыдущими, т.к. проис-

ходит постепенное (без бросков) изменение электрических, электромеханических и технологических параметров (рис. 4,а, 5,а).

При параболическом законе изменения входного воздействия (кривые рис. 4,б, 5,б) отмечено наличие незначительных скачков пускового тока и момента (порядка 10–15 %), превышения напора насоса (10 %) при пуске и плавное снижение электрических и механических параметров. При останове НА наблюдается противоток жидкости и небольшие колебания напора с последующим ростом до значения противодавления.

Особого внимания заслуживают переходные процессы в ЭГК при резком останове НА в гидросети с противодавлением и с последующим срабатыванием запорно-регулирующей арматуры (рис. 6). При этом наблюдается резкое снижение электромагнитного момента и тока, что, в свою очередь, приводит к изменению направления потока жидкости в трубопроводе. Условием схлопывания обратного клапана является появление противотока жидкости, создающего необходимое давление на обратный клапан.

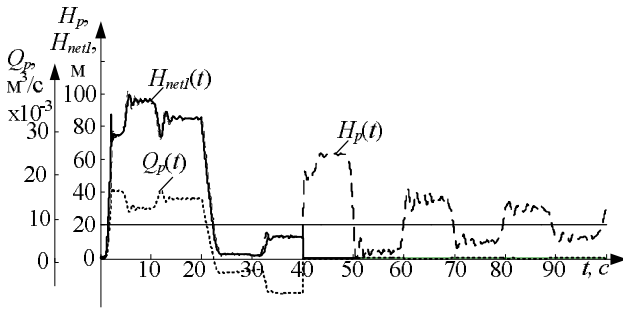


Рисунок 6 – Кривые изменения напора  $H_p(t)$  на выходе насоса, на выходе первого участка трубопроводной сети  $H_{net1}(t)$  и у потребителя  $H_{con}(t)$ , а также производительности на выходе насоса  $Q_p(t)$  при срабатывании обратного клапана

В рассматриваемом случае в момент времени  $t = 40$  с происходит схлопывание обратного клапана. В сигнале напора (рис. 6) на выходе насоса присутствуют затухающие колебания, обусловленные инерционностью потока жидкости в трубопроводе большой протяженности и наличием противодавления в гидросети.

Анализ переходных процессов в ЭГК при различном темпе изменения входного напряжения позволил оценить показатели качества пусковых режимов ЭП насоса (табл. 1) и выделить основные преимущества различных способов пуска/торможения. Так, установлено, что управляемый пуск НА позволяет снизить динамические нагрузки в ЭП, избежать скачков напора и производительности в трубопроводной сети. Получено, что с целью предотвращения токовых и динамических нагрузок в ЭГК целесообразно использовать линейный закон формирования напряжения.

*С. Энергетические процессы в переходных режимах ЭГК*

Функционирование ЭГК сопровождается непрерывным преобразованием параметров энергетического режима: электрической мощности в механическую, а затем в гидравлическую мощность насоса, трубопроводной сети и потребителя.

Ниже приведены аналитические выражения для получения мощностей на элементах силового канала ЭГК [10–12].

Так, электрическая мощность, подводимая к обмоткам статора АД, Вт:

$$p_{el}(t) = u_{1u}(t)i_{1u}(t) + u_{1v}(t)i_{1v}(t), \quad (7)$$

где  $u_{1u}, u_{1v}, i_{1u}, i_{1v}$  – векторы напряжений и токов по соответствующим координатам.

Гидравлическая мощность на выходе НА, Вт:

$$p_{hp}(t) = \rho g Q_p(t) H_p(t). \quad (8)$$

Гидравлическая мощность на  $i$ -том участке трубопровода, Вт:

$$p_{hneti}(t) = \rho g Q_{neti}(t) H_{neti}(t). \quad (9)$$

Гидравлическая мощность потребителя, Вт:

$$p_{con}(t) = \rho g Q_{con}(t) H_{con}(t). \quad (10)$$

Таблица 1 – Показатели качества пусковых режимов ЭП насоса

Способ запуска ЭП НА	Превышение частоты вращения, % от $\omega_n$	Превышение пускового тока, % от $I_n$	Превышение пускового момента, % от $M_n$	Превышение напора насоса, % от $H_n$
Прямой пуск на открытую задвижку	6	76	56	17
Прямой пуск на закрытую задвижку	4,58	74	53	9
Плавный запуск по линейному закону	0,19	3,38	3,84	5,38
Плавный запуск с ограничением пускового тока	0,29	6,98	6,7	5,88
Плавный запуск по параболическому закону	0,48	14,29	13,3	13,35

В переходних режимах токи, протекающие по обмоткам двигателя, существенно превышают номинальные значения и вызывают повышенные потери энергии, т.е. дополнительный нагрев двигателя. В связи с этим заслуживает внимания определение потерь электроэнергии в переходных процессах ЭП, где динамический режим является основным или занимает заметное время в течение цикла работы [13].

Потери мощности на  $i$ -том элементе ЭГК в переходных режимах определяются из выражения, Вт:

$$\Delta P_i = \frac{1}{t_{tp}} \int_0^{t_{tp}} p_i(t) dt, \quad (11)$$

где  $t_{tp}$  – время протекания переходного процесса, с;  
 $p_i(t)$  – временная зависимость мощности на  $i$ -том элементе ЭГК, Вт.

При плавном задании скорости идеального холостого хода потери снижаются. Чем медленнее разгон, тем меньше момент и суммарные потери за время пуска. Однако это справедливо при отсутствии потерь, связанных с наличием статической нагрузки, которые увеличиваются с ростом времени пуска.

Кривые изменения мощности на элементах силового канала ЭГК при формировании различных законов изменения входного воздействия приведены на рис. 7, 8.

Анализ полученных кривых показал, что прямой пуск на открытую задвижку на выходе НА, характеризующийся большими пусковыми токами и моментами, а также скачками технологических параметров, сопровождается превышением электрической мощности в 10 раз по отношению к ее номинальному значению (рис. 7,а). Запуск насоса на закрытую задвижку позволяет снизить динамические нагрузки в ЭП, что приводит к снижению потерь электрической мощности при пуске в 7,5 раза.

Формирование плавного темпа нарастания/снижения входного напряжения позволяет практически избежать скачков электрической мощности в переходных режимах, а также обеспечить плавное изменение гидравлической мощности на выходе насоса и в трубопроводной сети.

В табл. 2 приведены значения потерь мощности при пуске и останове НА при различных темпах изменения входного воздействия.

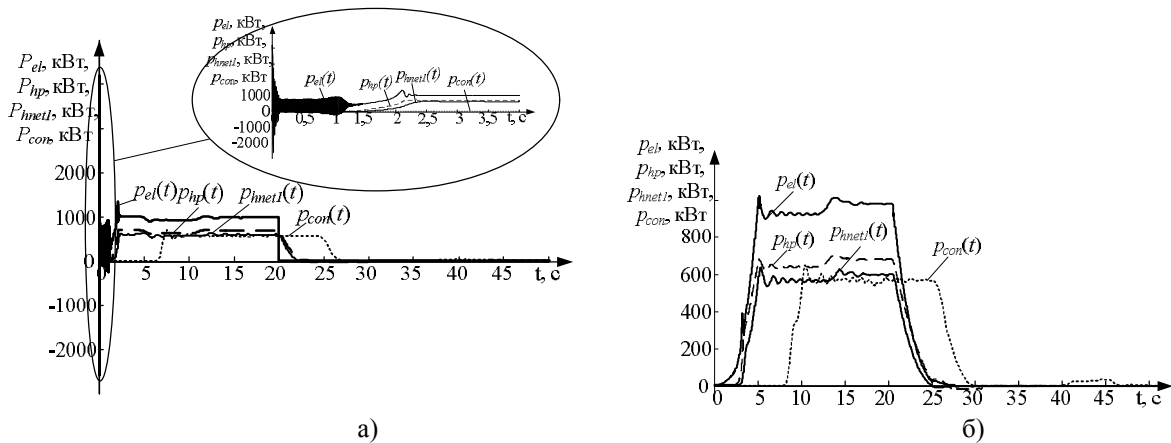


Рисунок 7 – Кривые изменения электрической мощности  $p_{el}(t)$ , гидравлической мощности насоса  $p_{hp}(t)$ , гидравлической мощности на выходе первого участка трубопровода  $p_{hnet}(t)$  и у потребителя  $p_{con}(t)$  при ступенчатом пуске а) и линейном б) законах изменения входного воздействия

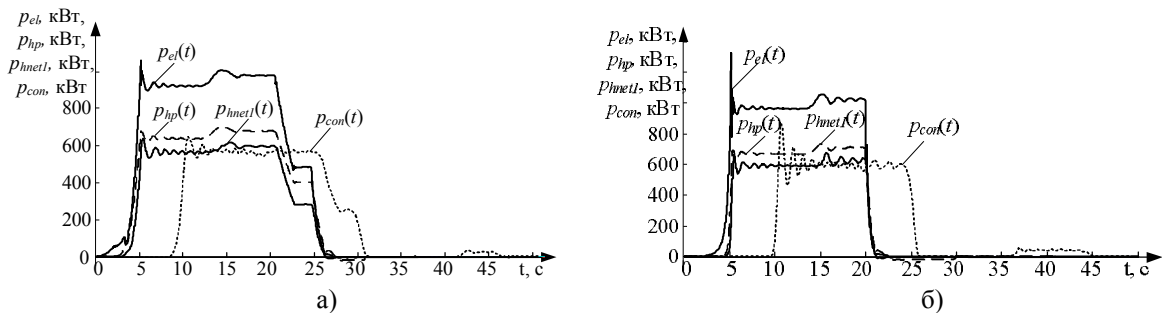


Рисунок 8 – Кривые изменения электрической мощности  $p_{el}(t)$ , гидравлической мощности насоса  $p_{hp}(t)$ , гидравлической мощности на выходе первого участка трубопровода  $p_{hnet}(t)$  и у потребителя  $p_{con}(t)$  при плавном запуске с функцией ограничения тока а) и параболическом б) законах изменения входного воздействия

Таблиця 2 – Потери мощности при различных темпах нарастания/снижения входного воздействия

Потери электрической мощности при пуске НА, % от $P_{eln}$	Потери гидравлической мощности при пуске НА, % от $P_{hpn}$	Потери электрической мощности при останове НА, % от $P_{eln}$	Потери гидравлической мощности при останове НА, % от $P_{hpn}$
Прямой пуск на открытую задвижку			
57	23	89	34
Прямой пуск на закрытую задвижку			
39	24	9	26
Плавный запуск по линейному закону			
27	21	23	21
Плавный запуск с ограничением пускового тока			
17	12	39	38
Плавный запуск по параболическому закону			
14	7	5	4

Из анализа полученных результатов видно, что использование регулируемого пуска является энергоэффективным мероприятием. Подтверждением сказанному является снижение потерь мощности при пуске. Так, при линейном законе потери электрической мощности снижаются в два раза, гидравлической – остаются такими же; при плавном запуске с функцией ограничения тока потери электрической и гидравлической мощностей снижаются в 3,4 и 2 раза соответственно; при параболическом – в 4 и 3,3 раза соответственно. Использование управле-

мого останова НА также позволяет достичь экономии энергии: минимальное значение потерь мощности при останове НА имеет место при формировании входного воздействия, изменяющегося по параболическому закону (табл. 2).

Обобщая вышесказанное, на рис. 9, 10 приведены диаграммы показателей качества переходных режимов ЭП насоса при различных темпах формирования входного воздействия.

**ВЫВОДЫ.** Показано, что электрогидравлические комплексы характеризуются существенными динамическими нагрузками при пуске технологического механизма, приводящими к преждевременному выходу из строя и износу насосного и трубопроводного оборудования. Для снижения динамических нагрузок в переходных режимах работы предложено использование систем плавного запуска насосного агрегата с различным темпом нарастания входного напряжения. Регулируемый пуск насосного агрегата позволяет исключить превышения напора и производительности, продлить срок эксплуатации электрогидравлического оборудования.

Установлено, что прямой запуск насосного агрегата на открытую задвижку в трубопроводной сети характеризуется наличием повышенного пускового тока и электромагнитного момента, бросками напора и производительности как на выходе насоса, так и у потребителя. При плавном темпе нарастания напряжения происходит постепенное (без бросков) изменение электрических, электромеханических и технологических параметров.

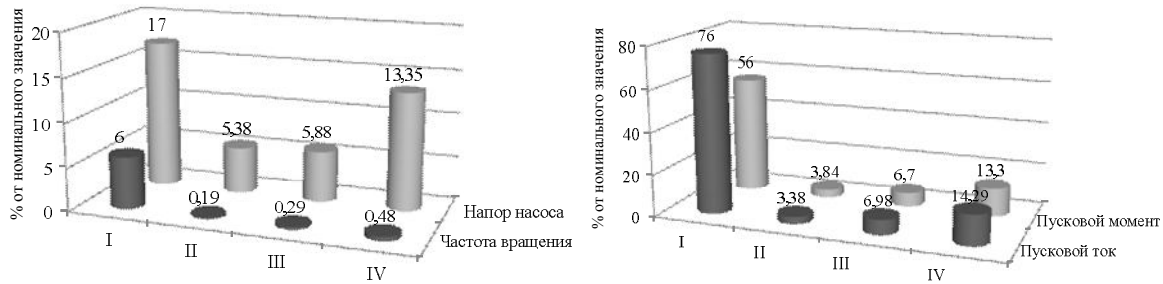


Рисунок 9 – Диаграммы изменения показателей качества переходных режимов ЭП насоса при различных законах формирования входного воздействия

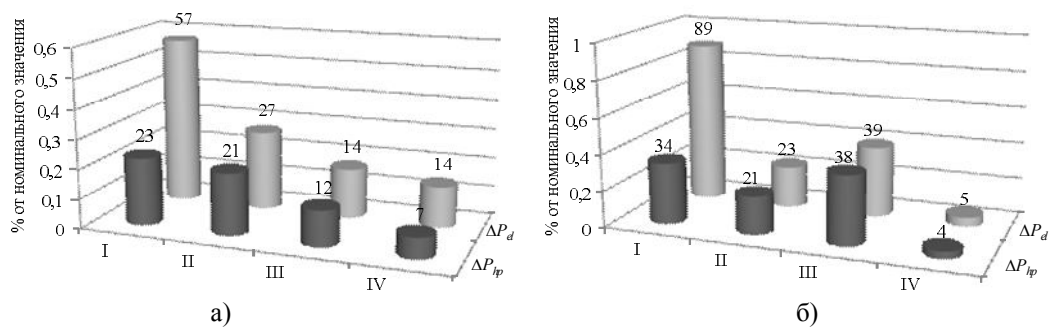


Рисунок 10 – Диаграммы изменения потерь мощности при пуске а) и останове б) насосного агрегата для различных законов формирования входного воздействия



Прямой останов насосного агрегата в гидросети с противодействием сопровождается резким снижением электромагнитного момента и тока, что, в свою очередь, приводит к изменению направления потока жидкости в трубопроводе. Поэтому является целесообразным выбор такого темпа изменения входного воздействия, который позволит снизить динамические и электрические нагрузки в насосном агрегате, обеспечить минимальные колебания технологических параметров с целью исключения гидравлических ударов в трубопроводе.

Разработанная модель электрогидравлического комплекса учитывает процессы энергопреобразования в элементах силового канала при различном темпе нарастания/снижения входного напряжения. Получено, что при прямом пуске насосного агрегата на открытую задвижку (наиболее тяжелый по динамическим нагрузкам способ запуска) потери электрической мощности составляют 57 % от номинального значения, а гидравлической – 23 %. Снижение потерь мощности в переходных режимах в электроприводе насосного агрегата возможно путем управляемого запуска и останова. Выполненный анализ изменения мощности и потерь мощности на элементах электрогидравлического комплекса показал, что наиболее энергоэффективным является параболический закон формирования входного напряжения: потери мощности при пуске и останове насосного агрегата снижаются почти в четыре раза.

С учетом вышесказанного, при разработке систем контроля и управления электрогидравлическими комплексами возникает необходимость формирования такого темпа изменения входного напряжения на регулируемый электропривод насоса, который обеспечит плавное (без бросков) изменение электрических и технологических параметров, минимальные потери мощности в переходных режимах, продлит срок службы электрогидравлического оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карелин В.Я., Новодережкин Р.А. Насосные станции с центробежными насосами. – М.: Стройиздат, 1983. – 224 с.
2. Лопастные насосы / Под ред. Л.П. Грянка, А.Н. Папира. – Л.: Машиностроение, 1975. – 432 с.
3. Поздеев Д.А., Ерезеев А.Н., Яковлев О.Г., Ко-

тельников О.В. Автоматизированная система плавного пуска высоковольтных двигателей магистральных насосов нефтепровода «Дружба» ОАО Транснефть // *Электротехника*. – 2006. – Вып. 6. – С. 2–10.

4. Фираго Б.И. Расчеты по электроприводе производственных машин и механизмов: учеб. пособие. – Минск: Техноперспектива, 2012. – 639 с.

5. Системы плавного пуска: учебное пособие // ABB Automation Technology Products AB, Control. – 2003. – 90 с.

6. Вишневицкий К.П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи. – М.: Агропромиздат, 1986. – 135 с.

7. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. – М.: Недра, 1975. – 296 с.

8. Попович М.Г., Борисюк М.Г., Гаврилюк В.А. та ін. Теорія електроприводу: підручник / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища школа, 1993. – 494 с.

9. Коренькова Т.В. Насоси. Особливості включення. Характеристики насосів і режимів енергоспоживання при перемінній швидкості обертання: навч. посібник. – Кременчук: КДПУ, 2002. – 56 с.

10. Zagirnyak M., Rodkin D., Korenkova T. Enhancement of instantaneous power method in the problems of estimation of electromechanical complexes power controllability // *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical review)*. – 2011. – Iss. 12b. – PP. 208–212.

11. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. Estimation of electromechanical systems power controllability according to instantaneous power component // *Proceedings of International IEEE Conference IEPS 2014*. – Kyiv, Ukraine, 2014. – PP. 266–272. – IEEE Catalog Number CFP1405X-PRT, ISBN 978-1-4799-2266-6

12. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. Identification of electrohydraulic complex parameters using instantaneous power component // *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical review)*, 2013. – Iss. 12b. – PP. 286–289.

13. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учебн. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.

#### DYNAMIC LOADS IN ELECTROHYDRAULIC COMPLEX WITH VARYING INCREASE INPUT VOLTAGE RATE

**V. Kovalchuk, T. Korenkova**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University  
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: viktoria\_kovalc@mail.ru

It was shown that the pumping units electrohydraulic systems direct start characterized by significant inrush current, dynamic torque and pressure, resulting in reduced service life of the electromechanical equipment, the development of hydraulic shocks, accidents in the pipeline network. The electrohydraulic complex mathematical model, for research the rate of input voltage influence for the transients occurrence was proposed. It is proved that the use of soft start/stop pumping unit with adjustable starting current, thus reducing dynamic load on the engine, eliminate the occurrence of oscillations in the pressure and productivity, reduce energy loss. It is shown that in the course of transient processes in electrohydraulic complex influenced acceleration/deceleration time, the geometry of the pipe, the presence of the static pressure in some parts of the drainage system, a way to run the technology mechanism. Formulated the main recommendations for the choice of the formation law of the input exposure.

**Key words:** electrohydraulic complex, transients, soft start, dynamic loads.

## REFERENCES

1. Karelin, V.Ya. and Novoderezhkin, R.A. (1983), *Nasosniye stantsii s tsentrobezhnyimi nasosami* [Pumping stations with centrifugal pumps], Stroyizdat, Moscow. (in Russian)
2. Gryanko, L.P. and Papira, A.N., (1975), *Lopastniye nasosy* [Lobe pumps], Mashinostroenie, Moscow. (in Russian)
3. Pozdeyev, D.A., Yeremeyev, A.N., Yakovlev, O. and Kotelnikov, O.V. (2006), Automated system for high-voltage soft starter motor pumps trunk pipeline Druzhba" OAO Transneft, *Elektrotehnika*, Vol. 6, pp. 2–10. (in Russian)
4. Firago, B.I. (2012), *Raschety po elektroprivodu proizvodstvennykh mashin i mekhanizmov: ucheb. posobiye* [Calculations on the drive industrial machinery: study guide], Tekhnoperspektiva, Minsk. (in Russian)
5. Sistemy plavnogo puska: uchebnoye posobiye [Softstarters. Study Guide] (2003), *ABB Automation Technology Products AB, Control*. (in Russian)
6. Vishnevskiy, K.P. (1986), *Perekhodnie processi v napornikh sistemakh vodopodachi* [Transients in pressurized water supply systems], Agropromizdat, Moscow, Russia. (in Russian)
7. Charniy, I.A. (1975), *Neustanovivsheesya dvizhenie realnoy zhidkosti v trubakh* [Unsteady motion of a real fluid in pipes], Nedra, Moscow. (in Russian)
8. Popovich, M.G., Borusyuk, M.G., Gavrilyuk, V.A. et al. (1993), *Teoriya elektroprivoda: pidruchnyk* [Electric drive theory: Textbook], Vishcha shkola, Kyiv. (in Ukrainian)
9. Korenkova, T.V. (2002), *Nasosy. Osoblivosti vklyuchennia. Kharakteristiki nasosiv I rezhimiv energospozhivannya pri pereminni shvydkosti obertannya: navch. posibnyk* [Pumps. Peculiarities include. Characteristics pumps and power consumption modes with variable rotation speed: Tutorial], Kremenchuk, KDPU. (in Ukrainian)
10. Zagirnyak, M., Rodkin, D. and Korenkova, T. (2011), "Enhancement of instantaneous power method in the problems of estimation of electromechanical complexes power controllability", *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical review)*, no 12b, pp. 208–212.
11. Zagirnyak, M., Kovalchuk, V. and Korenkova, T. (2014), "Estimation of electromechanical systems power controllability according to instantaneous power component", *Proceedings of International IEEE Conference IEPS 2014, Kyiv, Ukraine*, pp. 266–272, *IEEE Catalog Number CFP1405X-PRT, ISBN 978-1-4799-2266-6*
12. Zagirnyak, M., Kovalchuk, V. and Korenkova, T. (2013), "Identification of electrohydraulic complex parameters using instantaneous power component", *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical review)*, Vol. 12b, pp. 286–289.
13. Braslavskiy, I.Ya., Ishmatov, Z.Sh., and Polyakov, V.N. *Energoberegayushchyy asinkhronnyy elektroprivod: uchebnoye posobiye dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy* [Energy-saving asynchronous electric: education. benefits for higher education establishments students], Akademia, Moscow. (in Russian)

Стаття надійшла 23.08.2015.